

***А. А. Карпов\****

Вятский государственный университет, г. Киров

*\*karpov.kirov@gmail.com*

## ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА ВНУТРЕННЕЕ ТРЕНИЕ И СТРУКТУРУ СПЛАВОВ СИСТЕМЫ Fe–V

Исследовано влияние температуры высокотемпературного отжига на величину зерна и демпфирующую способность двойных сплавов железа с добавлением ванадия. Концентрация ванадия до 18 %. Установлено, что увеличение размеров зерна после термической обработки мало влияет на демпфирующую способность сплава. Также отсутствует взаимосвязь между известными зависимостями магнитострикции насыщения данных сплавов и их демпфирующей способностью.

*Ключевые слова:* сплавы Fe–V, внутреннее трение, демпфирующая способность, высокотемпературный отжиг, магнитомеханическое затухание.

***A. A. Karpov***

## HEAT TREATMENT INFLUENCE TO INTERNAL FRICTION AND STRUCTURE OF FE-V SYSTEM ALLOYS

The high-temperature annealing influence to a grain size and a damping capacity of Fe-V alloys were studied. The vanadium concentration is up to 18 %. The grain size increase after the heat treatment has little effect on the damping capacity of examined vanadium alloys. There is no relationship between the known dependencies of saturation magnetostriction of these alloys and their damping capacity.

*Keywords:* Fe–V alloys, internal friction, Damping capacity, high-temperature annealing, magneto mechanical damping.

Сплавы на основе железа достаточно часто применяются в качестве демпфирующих, обладая по сравнению с другими сплавами рядом преимуществ, среди которых необходимо выделить низкую стоимость, разнообразие и сочетание полезных свойств, наличие ферромагнетизма в качестве дополнительного источника внутреннего трения. Особый интерес как ферромагнетики представляют двойные сплавы железа с расширяющейся альфа-областью и повышающейся точкой Кюри в зависимости от увеличения концентрации второго компонента.

Впервые это было рассмотрено для сплавов системы Fe–Co, для которых увлечение концентрации кобальта сопровождается увеличением

температуры  $\alpha \leftrightarrow \gamma$  превращения и температуры Кюри. Было показано, что высокое внутреннее трение обусловлено, главным образом, магнитомеханическими явлениями и зависит от концентрации второго элемента [1]. Также проводились исследования двойных сплавов Fe с другими элементами – Al, Cr, Ge, Ga, Si, Mo, V, W [2], подтверждающими указанные закономерности.

Представляют интерес сплавы системы железо–ванадий, малоизученные [3, 4] в современном материаловедении с точки зрения высокого демпфирования. При этом, так как существует взаимосвязь между магнитомеханическими характеристиками сплава и его внутренним трением, необходимо отметить, что сплавы системы Fe–V обладают высокой магнитострикцией насыщения: по данным работы [5] можно выделить сплавы с концентрацией 10,3 и 30,7 ат. % V, магнитострикция насыщения в которых составляет 68,8 и 49,3 ppm. Это сравнимо с такими сплавами, как пермендюры и альферы.

При этом, как было показано в работах [6, 7], взаимосвязь между магнитострикцией насыщения и характеристиками внутреннего трения сплава, в частности с логарифмическим декрементом затухания, не всегда прямая и требует дальнейшего изучения.

Таким образом, исследование внутреннего трения в сплавах Fe–V представляется интересным с двух точек зрения: 1) исследовать характеристики внутреннего трения и сделать выводы о его природе; 2) установить закономерности магнитомеханического затухания в зависимости от характеристик магнитострикции.

В работе использованы сплавы системы Fe–V технической чистоты. Сплавы выплавлены в открытой индукционной печи на ОАО ЭМСЗ им. «Лепсе» (г. Киров). Состав сплавов приведен в табл. 1.

Таблица 1

Состав сплавов Fe—V

Обозначение	Содержание V, %
Ф	0,15
Ф4	4
Ф10	10
Ф18	18

Термическая обработка сплавов проводилась в вакуумной печи «Вега» (типа СНВЭ-2.4.2/16) в ФГБОУ ВО «ВятГУ» (г. Киров). Режимы термообработки приведены в табл. 2.

Характеристика внутреннего трения — логарифмический декремент колебаний  $\delta$  определялась методом свободных затухающих колебаний на обратном крутильном маятнике, разработанном и изготовленном в ФГБОУ ВО «ВятГУ» (г. Киров) [8].

Таблица 2

## Режимы термической обработки

Обозначение	Скорость нагрева, °С/ч	Температура выдержки, °С	Время выдержки, ч	Скорость охлаждения, °С/ч
Отжиг 1000	1000	1000	1,0	300 до 650 °С
Отжиг 1150	1000	1150	1,0	300 до 650 °С
Отжиг 1300	1000	1300	1,0	300 до 650 °С

Для определения условного среднего диаметра зерна использован метод пересечения прямых линий с границами зерен. Зеренную структуру сплавов выявляли методом вакуумного травления при высокотемпературных отжигах.

При увеличении температуры отжига для исследованных сплавов системы железо–ванадий наблюдается рост зерна  $\alpha$ -фазы (рис. 1–4).

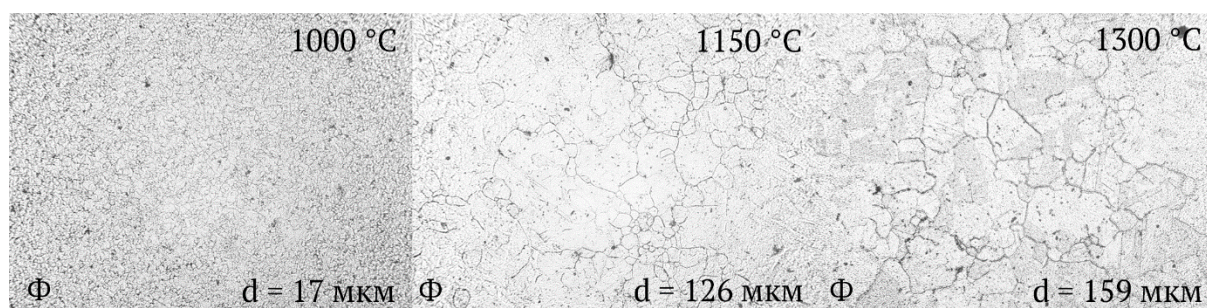


Рис. 1. Микроструктуры сплава Fe–0,15 % V (Ф) при различных температурах отжига

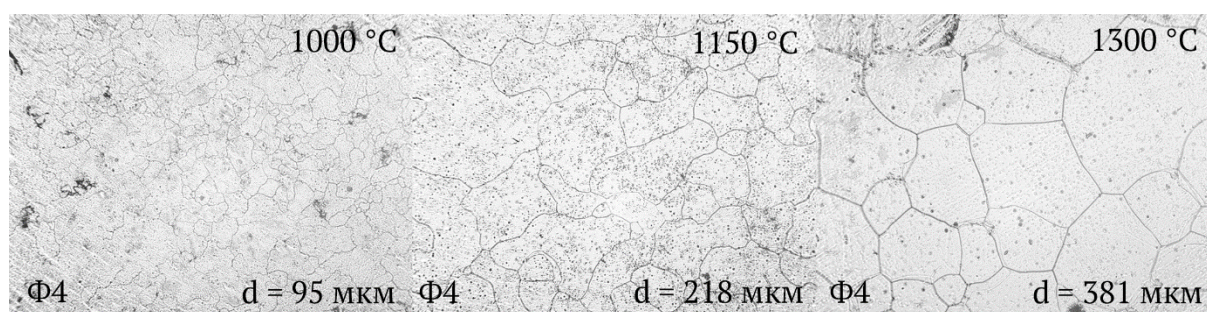


Рис. 2. Микроструктуры сплава Fe–4 % V (Ф4) при различных температурах отжига

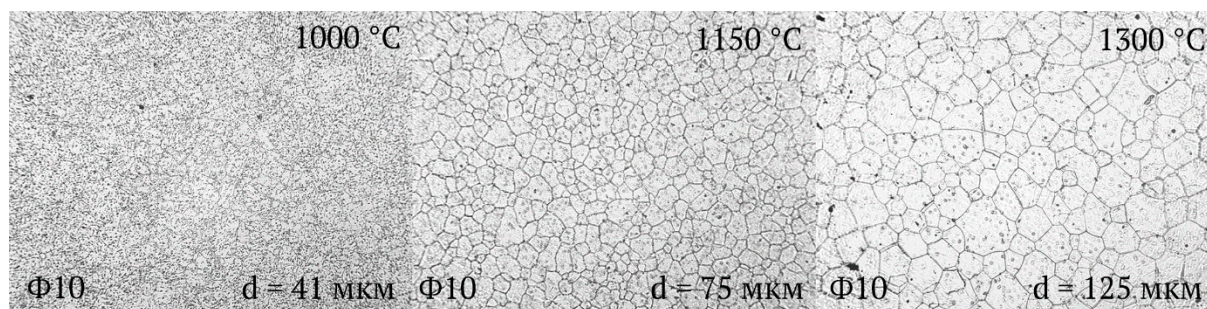


Рис. 3. Микроструктуры сплава Fe–10 % V (Ф10) при различных температурах отжига



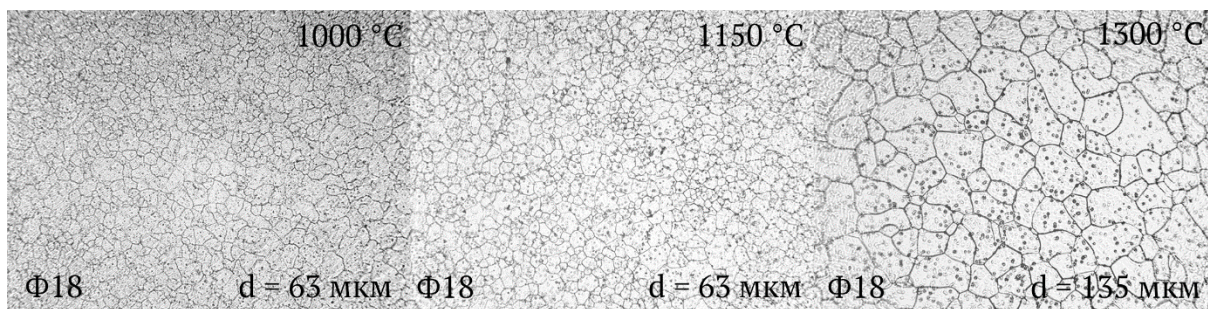


Рис. 4. Микроструктуры сплава Fe–18 % V (Ф18) при различных температурах отжига

Зависимости среднего размера зерна от температуры отжига для исследованных сплавов системы Fe–V приведены на рис. 5.

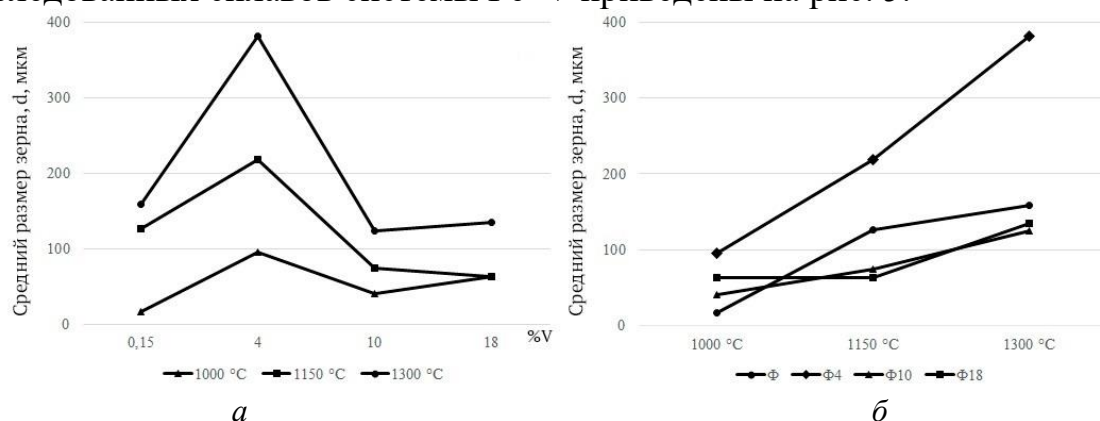


Рис. 5. Зависимости среднего размера зерна от: *а* – концентрации ванадия для исследованных сплавов в зависимости от температуры отжига; *б* – от температуры отжига для исследованных сплавов;  
 Ф – Fe–0,15 % V; Ф4 – Fe–4 % V; Ф10 – Fe–10 % V; Ф18 – Fe–18 % V

По данным виброграмм находим параметр внутреннего трения (характеристики демпфирующей способности) — максимум логарифмического декремента на его амплитудной зависимости  $\delta_m$  (рис. 6).

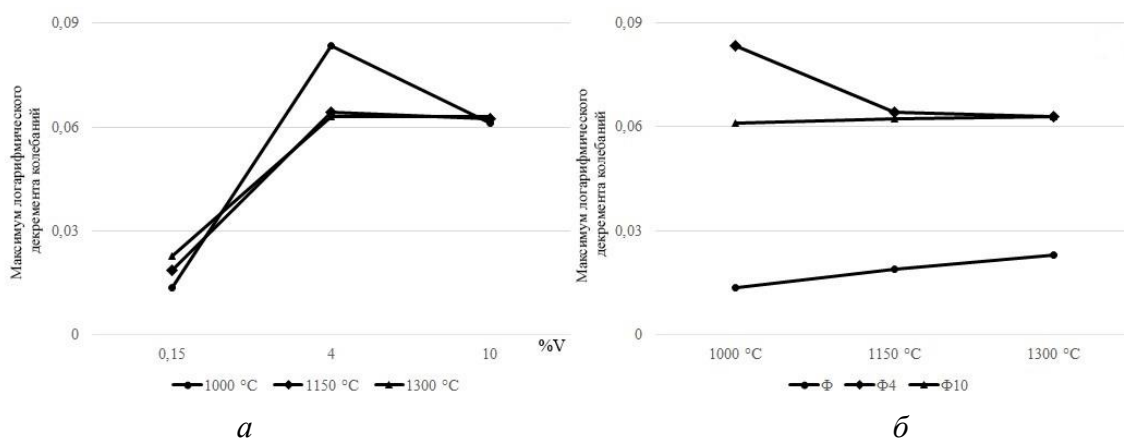


Рис. 6. Зависимость максимума логарифмического декремента колебаний *а* – от концентрации ванадия для исследованных сплавов в зависимости от температуры отжига и *б* – от температуры отжига для исследованных сплавов: Ф – Fe–0,15 % V; Ф4 – Fe–4 % V; Ф10 – Fe–10 % V; Ф18 – Fe–18 % V

По результатам работы можно сделать выводы:

1. Установлено, что с повышением температуры отжига в сплавах системы железо–ванадий значительно увеличивается зерно.

2. Рост зерна в исследуемых сплавах (за исключением сплава с низким содержанием ванадия – 0,15 %) фактически не влияет на демпфирующую способность.

3. По данным работы [5] видно, что магнитострикция насыщения в сплавах Fe–V увеличивается с 24,7 до 68,8 ppm в интервале концентраций 5,2–10,3 % V, а затем падает до 10,5 ppm при концентрации 20,8 % V. Эта зависимость не связана с полученными зависимостями внутреннего трения. Таким образом, исследование взаимосвязей между магнитострикцией и демпфирующей способностью, обусловленной магнитомеханическим затуханием (ММЗ), требует дальнейших исследований.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Cochard A. Magnetomechanical damping // *Magnetic Properties of Metals and Alloys: A Seminar on the Magnetic Properties of Metals and Alloys*, Cleveland, Oct. 25–26. 1958.
2. Blanter M. S. Internal friction in metallic materials. Berlin: Springer, 2007. V. 90: Springer series in materials science, 0933–033X.
3. Mills B. The zener relaxation in some high purity iron-vanadium alloys // *Le Journal de Physique Colloques*. 1971. V. 32, No. C2. P. C2–43–C2–47.
4. Скворцов, А. И., Кондратов В. М. Демпфирующие и механические свойства двойных сплавов железа с хромом, молибденом, ванадием // *Термическая обработка и физика металлов*. Свердловск: УПИ, 1989. С. 49–53.
5. Magnetostriction of Fe<sub>100–x</sub>V<sub>x</sub> alloys for 5.2<x<40.7 / C. Bormio–Nunes [et al.] // *Journal of Alloys and Compounds*. 2013. V. 553. P. 233–238.
6. Скворцов А.И., Карпов А.А. Физические свойства ванадийсодержащих сплавов железа в зависимости от содержания хрома и температуры отжига // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. 2015. Т. 12, № 1. С. 39–42
7. I. Skvortsov, M. A. Melchakov, A. A. Karpov. Physical and mechanical properties of Fe–Cr–V damping corrosion-resistant alloys // *Inorganic Materials: Applied Research*. 2016. V.7, No. 4. P. 559–563.
8. Мельчаков М.А. Влияние термической и термомагнитной обработок на свойства и структуру высокодемпфирующих сплавов Fe–Cr, Fe–Al: дис. канд. техн. наук, Екатеринбург, УрФУ. 2013.